



Міністерство освіти і науки України
Запорізька державна інженерна академія

Г.Г. Коломоєць

ФІЗИЧНІ ОСНОВИ СЕНСОРИКИ

Конспект лекцій

*для студентів ЗДІА
спеціальності “Фізична та біомедична електроніка”
денної та заочної форм навчання*

Запоріжжя
2014

Міністерство освіти і науки України
Запорізька державна інженерна академія

ФІЗИЧНІ ОСНОВИ СЕНСОРИКИ

Конспект лекцій

для студентів ЗДІА
спеціальності “Фізична та біомедична електроніка”
денної та заочної форм навчання

Фізичні основи сенсорики. Конспект лекцій для студентів ЗДІА спеціальності “Фізична та біомедична електроніка” денної та заочної форм навчання / Укл.: Г.Г. Коломоєць.- Запоріжжя, 2014. – 63 с.

Укладач: *Г.Г. Коломоєць, к.ф.-м.н., доцент*

Відповідальний за випуск: *зав. кафедрою ФБМЕ
професор Є.Я. Швець*

ЗМІСТ

Вступ.....	4
1. Основні поняття та визначення.....	5
2. Класифікація вимірювальних перетворювачів.....	8
3. Теплові сенсори.....	13
3.1. Загальні відомості.....	13
3.2. Датчики температури на основі термопар.....	19
3.3. Терморезистивні датчики.....	20
3.4. Основи безконтактної термометрії.....	29
4. Резистивні електричні перетворювачі.....	33
4.1. Резистори.....	33
4.2. Реостатні перетворювачі переміщень.....	38
4.3. Резистивні перетворювачі струму та напруги.....	40
4.3.1. Додаткові опори.....	40
4.3.2. Шунти.....	44
4.3.3. Дільники напруги.....	47
5. Тензорезистивні сенсори.....	49
Перелік літератури.....	63

ВСТУП

Одним з напрямів науково-технічного прогресу є вдосконалення тих, що існують і створення нових засобів вимірювань, зокрема, вимірювальних перетворювачів фізичних величин. Вимірювальні перетворювачі як засоби вимірювань, призначені для перетворень фізичних величин в зручні для вимірювань або подальших перетворень вихідні сигнали, знаходять все більш широке застосування як у вимірювальній техніці, так і в автоматизованих системах управління технологічними процесами. Особливого значення вони набувають у вимірюваннях параметрів живого організму, оскільки в цьому випадку вимірювані величини, як правило, на багато порядків менше, ніж при технічних вимірюваннях.

Даний конспект лекцій призначений для більш вдалого засвоєння студентами матеріалу, який передбачається робочою програмою з дисципліни «Фізичні основи сенсорики». Особливу увагу приділено класифікації вимірювальних перетворювачів, та улаштуванню та принципам дії теплових, резистивних та механорезистивних перетворювачів.

1. Основні поняття та визначення

Датчик – це засіб вимірювань, що є конструктивно завершеним пристроєм та виконує функцію вимірювального перетворювача.

Сенсор – первинний вимірювальний перетворювач, що входить до складу датчика.

Треба відмітити, що **сенсор** (чутливий елемент) та **датчик** часто вживаються як синоніми більш загального терміна **перетворювач**. В точному сенсі цього слова, що визначений Оксфордським словником, **вимірювальний перетворювач** є пристроєм, що перетворює зміну однієї величини в зміну іншої.

В термінах електроніки **вимірювальний перетворювач** визначається звичайно як прилад, що перетворює неелектричну фізичну величину (що має назву **вимірюваної фізичної величини**) в електричний сигнал, або навпаки.

Звідки випливає, що вимірювальні перетворювачі використовуються в електричних системах, тобто в технічних пристроях з електричним сигналом, що відображує результат вимірювань чи спостережень. З іншої сторони, вимірювальний перетворювач може бути використаний на виході системи, щоб, наприклад, генерувати механічний рух в залежності від електричного керуючого сигналу.

Прикладом реалізації перетворювачів є система, в якій мікрофон (вхідний перетворювач) перетворює звук (вимірювану фізичну величину) в електричний сигнал. Цей електричний сигнал підсилюється, а потім поступає на гучномовець (вихідний перетворювач), що відтворює звук, істотно більш гучний, ніж той, що сприймається мікрофоном.

Досить часто вимірювана величина, згідно з її визначенням, просто вимірюється електронною системою, а результат, що було отримано, тільки відображується або запам'ятовується. Однак у деяких випадках вимірювання створюють вхідний сигнал керуючої схеми, яка служить або для регулювання вимірюваної величини, або для керування змінною величиною у відповідності з вимірюваною. Прийнято розрізняти ці області використання

перетворювачів, та називати їх відповідно **контрольно-вимірювальне обладнання** та **керуюче обладнання**. Основні складові контрольно-вимірювального обладнання представлені на рис. 1.1.

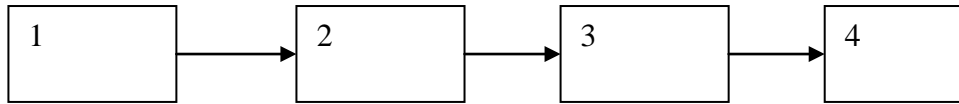


Рис. 1.1. Основні складові контрольно-вимірювального обладнання:

- 1 – вимірювана величина;
- 2 – вимірювальний перетворювач;
- 3 – лінія зв’язку;
- 4 – відображення або запам’ятовування.

На рис. 1.2. представлена типова схема керування.

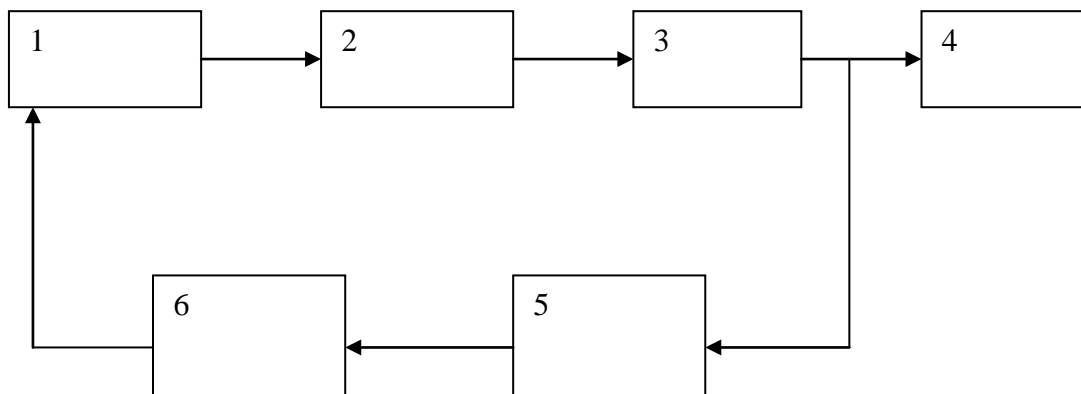


Рис. 1.2. Типова схема керування:

- 1 – вимірювана величина;
- 2 – вимірювальний перетворювач;
- 3 – лінія зв’язку;
- 4 – відображення або запам’ятовування;
- 5 – компаратор;
- 6 – виконуючий пристрій.

Процес керування є необхідним, зокрема, для того, щоб контролювати виробничі процеси (наприклад, контролювати та управляти процесом прокату сталі) та т.п.

Тобто, ми бачимо, що по суті частина системи керування є контрольно-вимірювальною системою.

На рис. 1.1, 1.2 цифрою 2 позначений вимірювальний перетворювач. Його ще називають вхідним перетворювачем. Цифрою 6 позначений виконуючий пристрій. Він може мати назву вихідного перетворювача.

Згідно з цими двома схемами вхідний перетворювач перетворює будь-яку фізичну величину в електричний сигнал.

Вихідний перетворювач згідно з рис. 1.2 перетворює електричний сигнал у деяку фізичну величину.

Іноді те, що вхідний перетворювач повинен звідки-небудь отримувати енергію, щоб виконувати процес перетворення (або безпосередньо від самої вимірюваної величини, або від зовнішнього джерела) допомагає визначити тип пристрою. Наприклад, вхідний перетворювач, що отримує енергію від вимірюваної величини, часто називають **пасивним перетворювачем**. Тобто, пасивний перетворювач – це і є чутливий елемент, сенсор, або датчик. Згідно з цією схемою, вихідний перетворювач є **активним перетворювачем**. Такий перетворювач отримує енергію від зовнішнього джерела (він перетворює електричний сигнал в деяку фізичну величину).

Пасивні перетворювачі мають інші назви. Наприклад: **трансмітер, детектор, комірка, вимірювач, чутливий елемент, зонд**, а також слова, що мають закінчення «-метр» або «-мір», а саме : акселерометр, витратомір, тахометр. Це все приклади вхідних перетворювачів.

Вхідних перетворювачів істотно більше, ніж вихідних. Тому, коли кажуть просто «перетворювач» мають на увазі вхідний перетворювач, тобто такий перетворювач, який перетворює вимірювану фізичну величину в електричний сигнал.

2. Класифікація вимірювальних перетворювачів.

В даний час існує безліч різноманітних за принципом дії і призначенням датчиків і сенсорів. В той же час з розвитком науки і техніки має місце подальше їх удосконалення, виникають їх нові види. Вивчення всієї різноманітності датчиків неможливе без систематизації їх властивостей та класифікації.

Існує декілька індивідуальних підходів до класифікації датчиків і сенсорів, що переслідують головним чином одну мету - систематизацію накопичених даних для полегшення їх вивчення та використання.

Завдання класифікації в першу чергу висуває вимогу встановити доцільні класифікаційні ознаки. Ці ознаки повинні бути достатньо загальними, щоб враховувати вимоги як фахівців, що працюють у області дослідження і проектування датчиків і сенсорів, так і тих, хто займається питаннями їх застосування. Для споживача класифікація датчиків і сенсорів з погляду їх застосування є ймовірно найбільш природною. Фахівець, якого, наприклад, цікавить вимірювання температури, серед безлічі перетворювачів температури шукатиме ті, які найбільшою мірою задовольняють вимогам за діапазоном, точністю і т.п. При цьому важливе значення має і природа вихідного сигналу, оскільки вона визначає вибір методів і засобів подальшого перетворення або вимірювання.

Для того, хто вивчає конструкцію і технологію виготовлення датчиків і сенсорів, подібний підхід не є кращим, оскільки він заважає всебічному вивченню основних властивостей тих або інших перетворювачів. В цьому випадку вивчення перетворювачів за принципом їх дії забезпечує найбільший ефект. Дійсно, перед конструктором будь-якої техніки завжди стоїть завдання створення таких засобів, які найкращим чином задовольняють різноманітним вимогам сучасної техніки. Рішення цієї задачі вимагає фундаментального вивчення фізичних основ роботи перетворювачів, особливостей їх поведінки в умовах дії найрізноманітніших впливаючих

чинників, дослідження нових конструктивних принципів побудови, використання новітніх досягнень науки при створенні нових видів медичних датчиків і сенсорів. Отже, при такому підході в основу їх класифікації слід покласти фізичний принцип дії, або, точніше, фізичні закономірності, що визначають принцип його дії.

Як класифікаційні ознаки приймають також вид функції перетворення, який визначається призначенням датчика, структурну схему або його місце в структурній схемі засоба вимірювань, принцип зворотності, енергетичні властивості вихідного параметра і т.п. Використавши ті або інші класифікаційні ознаки, можна привести ряд класифікацій, кожна з яких по своєму відображає основні властивості датчиків і має як позитивні так і негативні сторони. Якнайповніше уявлення про всю різноманітність вимірювальних перетворювачів можна одержати, привівши загальну класифікацію з урахуванням багатьох класифікаційних ознак.

Залежно від роду вхідної і вихідної величин медичні датчики підрозділяються на перераховані нижче групи.

Дат чики-перет ворювачі елект ричних парамет рів інформації в елект ричні величини - вхідними і вихідними величинами таких перетворювачів є електричні величини. Це - перетворювачі розміру електричної величини (вимірювальні трансформатори, поділювачі струму і напруги), а також перетворювачі виду електричної величини, що перетворюють одну електричну величину в іншу(шунти, додаткові опори).

Дат чики-перет ворювачі неелект ричних величин в неелект ричні – вхідні та вихідні величини таких перетворювачів - неелектричні. Вони також можуть бути перетворювачами розміру тієї або іншої неелектричної величини (важелі, редуктори) або перетворювачами виду вхідної величини (консолі, мембрани, пружини та інші пружні механічні перетворювачі).

Дат чики-перет ворювачі елект ричних величин в неелект ричні т а дат чики-перет ворювачі неелект ричних величин в елект ричні є найбільш численною і різноманітною групою медичних датчиків. Це пояснюється, з

одного боку, численністю самих неелектричних величин, а з іншою - перевагами електричних методів вимірювань, і, відповідно, необхідністю перетворення неелектричних величин саме в електричні.

За виглядом функції перетворення медичні датчики розділяють на три великі групи: *масшт абні*, змінюючі в певне число разів розмір вхідної величини без зміни її фізичної природи; *функціональні*, такі, що здійснюють однозначне функціональне перетворення вхідної величини із зміною її фізичної природи або без її зміни; *операційні*, що виконують над вхідною величиною математичні операції вищого порядку - диференціювання або інтегрування за часовим параметром.

Залежно від виду вихідного сигналу датчика, яким може бути енергетичний процес або властивість речовини, розрізняються *генерат орні* та *парамет ричні* датчики. До *генерат орних* відносяться датчики, вихідні сигнали яких містять енергетичні властивості, зокрема, ними можуть бути е. р. с., електричний струм, механічна сила, тиск, і т.п. *Парамет ричними* є датчики, в яких зміна вхідного сигналу приводить до зміни їх певних параметрів - опору, ємності, індуктивності, пружності і ін. Для отримання вихідного енергетичного сигналу в цих випадках потрібні додаткові джерела енергії.

Вивчення властивостей датчиків і сенсорів по фізичних явищах і ефектах, покладених в основу їх роботи, дозволяє з'ясувати загальні властивості, знайти загальний підхід до питання схемного і конструктивного рішення задач, пов'язаних з їх розрахунком, конструюванням і застосуванням. За фізичними закономірностями, покладеними в основу принципу дії, медичні сенсори можуть бути розділені на наступні групи.

Резист ивні елект ричні та *механоелект ричні*, носієм вимірювальної інформації в яких є електричний опір. В основу принципу перетворення електричних резистивних сенсорів покладена залежність між напругою, струмом і електричним опором, яка визначена законом Ома. Принцип роботи механоелектричних резистивних сенсорів заснований на зміні електричного

опору під дією вхідної перетворюваної механічної величини медико-біологічної інформації.

Електростатичні - сенсори, до яких відносяться первинні вимірювальні перетворювачі, носієм вимірювальної інформації в яких є електричний заряд. Розрізняють два основні різновиди електростатичних сенсорів: ємнісні, принцип дії яких заснований на взаємодії двох заряджених тіл, і п'єзоелектричні, виникнення електричного заряду в яких є наслідком дії на сенсор механічних зусиль, зміни температури і інших чинників.

Сенсори *електродинамічної групи*, до яких відносяться сенсори, принцип дії яких заснований на виникненні механічних переміщень їх рухомих елементів під впливом електричного струму. Це електродинамічні, феродинамічні та магнітоелектричні сенсори.

Гальваномагнітні - сенсори, принцип дії яких заснований на використанні гальваномагнітних ефектів, суть яких полягає в зміні електричних параметрів сенсорів під впливом перетворюваного магнітного поля, зокрема зміні електричного опору (ефект Гауса) або появи е.р.с. (Ефект Холу). Основними різновидами гальваномагнітних сенсорів є відповідно магніторезистивні перетворювачі та перетворювачі Холу.

Електромагнітні - сенсори, які складають велику і різноманітну за принципом дії і за призначенням групу сенсорів, об'єднаних спільністю теорії і принципу перетворення, заснованого на використанні електромагнітних явищ.

Індукційні - сенсори, принцип дії яких заснований на законі електромагнітної індукції.

Теплові сенсори - це первинні вимірювальні перетворювачі, в основу принципу роботи яких покладені фізичні закономірності, визначені тепловими процесами в об'єктах. Основними різновидами теплових сенсорів є термомеханічні, терморезистивні та термоелектричні. Теплові сенсори - це в основному перетворювачі температури. Поряд з цим вони використовуються

і для перетворень інших неелектричних величин, які проявляються через теплові процеси і функціонально пов'язані з тепловими величинами (наприклад, хімічний склад речовин, концентрація, швидкість руху біологічних рідин і газів, та інші).

Елект рохімічні сенсори - це сенсори, принцип дії яких заснований на залежності електричних параметрів електролітичного середовища від складу і концентрації, температури та інших властивостей розчину, а також залежності електричної різниці потенціалів на межі розділу твердої і рідкої фаз від швидкості руху розчину. Вхідними сигналами електрохімічних можуть бути різноманітні величини інформації: якісний і кількісний склад складних рідких і газоподібних медико-біологічних середовищ і т.п. Основними різновидами електрохімічних сенсорів є електролітичні резистивні сенсори, гальванічні, полярографічні, електрокінетичні, хемотронні.

Оптичні сенсори - це сенсори, в основу принципу дії яких покладено перетворення потоку оптичного (світлового і теплового) випромінювання. Перетворення вимірювальної інформації здійснюється тут звичайно шляхом модуляції параметрів джерела випромінювання або оптичного каналу. Функціональні можливості оптичних МС і область їх застосування значно розширилися у зв'язку з досягненнями оптоелектронної техніки, зокрема, із створенням оптичних квантових генераторів, світлодіодів і т.п.

Квантові сенсори – це сенсори, принцип дії яких заснований на вибіркового поглинанні або випромінюванні електромагнітних хвиль речовиною, поміщеною в магнітне поле. Залежно від природи елементарних часток, що беруть участь в процесі резонансного поглинання або випромінювання енергії, розрізняють перетворювачі електронного парамагнітного та ядерного магнітного резонансу. До квантових відносяться також сенсори, принцип дії яких заснований на використанні ефекту Джозефсона.

3. Теплові сенсори

3.1. Загальні відомості

Традиційно температура вимірюється точними та простими ртутними термометрами, які відрізняються рівномірною шкалою, але мають такі недоліки, як великі габарити, масу, час, що є необхідним для вимірювання, можливість вимірювати температуру тільки на визначених ділянках.

Специфічними труднощами під час використання скляно-рідинних термометрів є також необхідність уведення поправки на стовбчик, що виступає, чутливість термометрів до тиску та до змін параметрів скла ковби термометру в часі. Тому актуальним стає застосування різноманітних медичних теплових сенсорів.

Тепловими сенсорами називають сенсори, принцип дії яких заснований на використанні теплових процесів (нагріву, охолодження, теплообміну) та вхідною величиною яких є температура тіла та внутрішніх органів. Слід відмітити, що теплові сенсори знайшли широке використання не тільки для вимірювань температури, але й таких величин, як тепловий потік, швидкість потоку газу чи рідини, витрачання, хімічний склад та тиск газів, вологість, рівень та т.і. При безпосередньому тепловому контакті сенсору та об'єкту дослідження переважає теплообмін шляхом теплопровідності та конвекції. В цьому випадку говорять про контактний засіб перетворення температури, а теплові датчики, засновані на використанні цього засобу теплообміну, називають контактними. Якщо сенсор та об'єкт дослідження не знаходяться у безпосередньому тепловому контакті, то теплообмін між об'єктом та сенсором може здійснюватися шляхом теплового випромінювання. Цей принцип теплообміну покладено в основу безконтактного способу вимірювання температури, а відповідні датчики називають безконтактними. В основі принципу дії теплових сенсорів найбільш часто використовують такі явища, як виникнення термо-е.р.с. та залежність опору речовини від температури, які

реалізуються в електронних термометрах на основі дрових та напівпровідникових термоелементів, термісторів та терморезисторів.

Слід відмітити, що цими видами теплових датчиків не вичерпується їх різноманітність. Температура є функцією стану речовини та безпосередньо пов'язана із внутрішньою енергією фізичних тіл та середовищ, а через неї - з іншими властивостями. В наслідок цього при вимірюванні температури змінюється багато фізичних властивостей тіл та середовищ, які використовуються при створенні теплових сенсорів. Так, наприклад, властивість теплового розширення газу використовується під час аналізу так званих газових термометрів. При цьому враховується взаємозв'язок між температурою, тиском та об'ємом для реальних газів, який описується рівнянням Ван-дер-Ваальса:

$$\left(P + \frac{a_1}{V^2} \right) (V - b_1) = R\theta, \quad (3.1)$$

де V - об'єм; P - тиск; θ - температура по абсолютній шкалі температур; R - універсальна газова стала; a_1, b_1 - сталі, які залежать від властивостей речовини та не залежать від стану та умов, в яких речовина знаходиться.

Під час аналізу процесів в газових теплових датчиках має бути використаною залежність тиску від температури при сталому об'ємі, або залежність об'єму від температури при сталому тиску. Практично термометрична речовина у датчику звичайно знаходиться при малому тиску та описується рівнянням Бертло:

$$PV = R\theta + P \left(b + \frac{a}{R\theta^2} \right), \quad (3.2)$$

де a, b, R - параметри, що характеризують термометричну речовину.

Термометричною речовиною в тепловому сенсорі може бути повітря.

Теплове розширення рідини дало змогу будувати рідинні термометри, які першими отримали розповсюдження та широко застосовуються в теперішній час. Діапазон вимірювання таких термометрів 200...1200 К.

Лінійне теплове розширення твердого тіла використовується при розбудові ділатометричних та біметалевих термометрів, що застосовуються у температурному діапазоні 200...650 К.

У широкому діапазоні температур перспективним є використання залежності шумової напруги $U_{ш}$ на резисторі R від температури θ у відповідності до формули Найквіста:

$$U_{ш}^2 = 4k\theta R\Delta f, \quad (3.3)$$

де k – стала Больцмана, Δf – смуга сприйманих частот. Практична реалізація методу міститься у порівнянні шумів двох ідентичних резисторів, один з яких знаходиться при відомій, а другий – при досліджуваній температурі. Шуми резисторів порівнюються або за величиною посиленої та випрямленої шумової напруги при високому рівні шумів (при температурах, вищих 500 К), або за кількістю шумових імпульсів – для більш низьких температур.

Зміна під впливом температури модуля пружності, отже, і власної частоти коливань кварцевих пластин використовується при побудові теплових кварцевих сенсорів. Така залежність описується рівнянням:

$$f_0 = \frac{N}{h}(1 + a\theta + b\theta^2 + c\theta^3), \quad (3.4)$$

де N – стала, h – товщина кварцевої пластини, a , b та c – коефіцієнти, які залежать від форми та розмірів чутливого елемента.

Кварцевий сенсор є кристалічним резонатором, який виконано у вигляді диску або лінзи, які поміщаються у герметизуючий кожух, заповнений гелієм.

Однією з вад кварцевих сенсорів є нестабільність їхньої функції перетворення при температурах, вищих за 100°C.

Властивість теплового випромінювання використовується при побудові безконтактних пирометричних перетворювачів, істотною перевагою яких є можливість дистанційного вимірювання. Таким чином, з одного боку, такий перетворювач не знаходиться у середовищі, температура якого вимірюється, та не руйнується, а з іншого – він не змінює теплового стану цього середовища.

Підчас аналізу роботи теплових датчиків слід спиратися на рівняння теплового балансу, згідно з яким кількість тепла, яка підводиться до сенсора Q_3 , дорівнює суммі кількості тепла Q_B , що віддається ним у середовище, та тепла Q_C , що іде на зміну його теплоємності:

$$Q_3 = Q_B + Q_C \quad (3.5)$$

Якщо температура та агрегатний стан теплової системи не змінюються, то кількість тепла, що поступає за одиницю часу (повний вхідний тепловий потік q_3) дорівнює повному тепловому потоку тепловіддачі q_B .

У загальному випадку перепад температур між частинами системи середовище – датчик зумовлює теплообмін, який може здійснюватися за допомогою теплопровідності, конвекції та теплового випромінювання. При теплообміні за допомогою теплопровідності перенос теплової енергії здійснюється шляхом взаємодії тіл, що знаходяться у безпосередньому контакті одне з одним та мають різну температуру.

Теплообмін за допомогою конвекції здійснюється шляхом переміщення частин середовища, що мають різну температуру.

Сутність теплообміну за допомогою випромінювання міститься у випромінюванні тілом електромагнітних хвиль певної довжини.

Отже, повний потік тепловіддачі

$$q_B = q_T + q_K + q_L, \quad (3.6)$$

де q_T , q_K та q_L – теплові потоки теплопровідності, конвекції та випромінювання.

Розповсюдження теплоти шляхом теплопровідності визначається законом Фур'є:

$$q_T' = -\lambda \frac{d\theta}{dl} , \quad (3.7)$$

де q_T' – тепловий потік через одиницю поверхні; $\frac{d\theta}{dl}$ - градієнт температури;

λ – коефіцієнт теплопровідності.

Повний тепловий потік, який створюється різницею температур, визначається залежністю:

$$q_T = \gamma_T \Delta\theta = \frac{1}{R_T} \Delta\theta , \quad (3.8)$$

де R_T – тепловий (термічний) опір середовища; γ_T – теплопровідність середовища.

За аналогією з електричною провідністю теплова провідність плоскої поверхні тіла може бути визначена як $\gamma_T = \lambda \frac{S_{cm}}{\delta}$ (тут S_{cm} та δ – площа та товщина стінки), а для циліндричної поверхні як $\gamma_T = \lambda \frac{2\pi l}{\ln \frac{d_1}{d_2}}$ (тут l – довжина

циліндру; d_1 і d_2 – діаметри відповідно зовнішньої та внутрішньої стінок циліндру).

Повний тепловий потік у результаті теплообміну шляхом конвекції згідно з формулою Ньютона

$$q_K = \alpha S_n \Delta\theta = \gamma_K \Delta\theta , \quad (3.9)$$

де α – коефіцієнт конвективного теплообміну, або тепловіддачі; $S_{\text{п}}$ – площа поверхні тіла; $\Delta\theta$ – різниця температур оточуючого середовища та тіла; $\gamma_{\text{к}}$ – повна провідність тепловіддачі шляхом конвекції.

При вимушеній конвекції для поперечного положення циліндру (перетворювача) коефіцієнт тепловіддачі для газів

$$\alpha_{\text{г}} = \frac{c\lambda}{d} \left(\frac{Vd}{\nu} \right)^n = \frac{c\lambda}{d} \text{Re}^n \quad , \quad (3.10)$$

де d – діаметр циліндру; V – швидкість руху газу; ν – кінематична в'язкість; λ – коефіцієнт теплопровідності газу; c, n – коефіцієнти, значення яких залежать від швидкості руху газу, а також розмірів теплочутливого елемента та визначаються за значенням критерія Рейнольдса $\text{Re} = \frac{Vd}{\nu}$ (при $\text{Re} = 5 \dots 80$ ці коефіцієнти відповідно дорівнюють $c = 0,93$, а $n = 0,40$; при $\text{Re} = 80 \dots 5000$ відповідно $c = 0,715$, а $n = 0,46$).

Для рідин коефіцієнт тепловіддачі

$$\alpha_{\text{р}} = \frac{c\lambda}{d} \text{Re}^n \text{Pr}^{0,4} \quad , \quad (3.11)$$

де $\text{Pr} = \frac{\nu}{a}$ - критерій Прандтля (тут a – температуропровідність рідини).

Значення приведених вище коефіцієнтів та критерієв даються у довідковій літературі. Слід відмітити, що їх розрахунок досить приблизний. Тому дуже часто значення цих коефіцієнтів визначають експериментально в умовах, відповідних до умов роботи датчиків та сенсорів.

3.2. Датчики температури на основі термопар

Добре відомі термопари, які широко застосовуються у вимірвальній техніці, потроху витісняються більш зручними напівпровідниковими термодатчиками (діодними, тріодними та т.п.) та особливо – найбільш відповідними для поєднання із засобами електромагнітної гіпертермії (завдяки нейтральності до електромагнітного поля) – світловолоконними термодатчиками. Це відбувається із-за незручностей, пов'язаних із необхідністю відслідковування температури не робочого (так званого “холодного”) спаю, а вдалих технічних засобів для цього немає. У класичному варіанті ця проблема вирішується шляхом поміщення його у танучий льод, що не завжди можливо. За всіма іншими параметрами термопарні датчики вельми привабливі : технологія виготовлення їх дуже проста та забезпечує високу повторюваність результатів вимірювання. Їх по праву можна віднести до найбільш дешевих та надійних термодатчиків. Приваблює також висока лінійність температурної залежності в інтервалі, істотному для техніки температур, внаслідок чого весь останній час продовжуються роботи з удосконалення технічної бази для них та методик роботи з ними у високочастотних полях.

Термопари відносяться до термоелектричних сенсорів і містять два електродні стріжня або пластинки, що виготовлені з різнорідних металів або сплавів та поєднані за допомогою спаю, при нагріванні якого у ланцюзі електродів генерується термо е.р.с., яка залежить від температури спаю.

В залежності від призначення термоелектричні сенсори поділяються на *занурювані*, призначені для вимірювань температури всередині досліджуваного середовища, та *поверхневі*, призначені для вимірювань температури будь-якої поверхні. Поверхневий термоелектричний датчик може мати вигляд кільця, або інший, занурюваний – може завдяки мікромініатюрним розмірам поміщатися у просвіті звичайної ін'єкційної голки для вимірювання локальної, внутрішньом'язової, підшкірної температури, температури всередині органів тіла, гіпертермії. За допомогою голки термоелектричний сенсор може навіть

уводитися у черепну порожнину та у хребет для вимірювання температури спинномозкової рідини.

Термоелектричні сенсори мають високу стабільність у часі, добру лінійність та швидкодію.

В залежності від інерційності вони поділяються на *малоінерційні*, показник теплової інерції (стала часу) яких не перевищує 5с для занурюваних та 10с для поверхневих; *середньої інерційності* – відповідно не більше 60 та 120 с; та *великої інерційності*, які мають показник теплової інерції до 180 та 300 с.

Усі перелічені переваги термопарних датчиків підвищили попит на них, що особливо виявляється при обладнанні вимірювачами температури спеціальних контрольно-вимірювальних стендів, оскільки кількість вбудованих у них термодатчиків може досягати декількох сотен, для того, щоб забезпечити найбільш об'єктивний відбір теплового розподілу досліджуваного об'єкта. Навіть у більш простих варіантах аналізу теплової картини за вдалістю організації одномірних багатоточкових вимірювачів температури термопарні датчики не поступаються багатоточковим світловолоконним.

Найголовнішим фактором для повторного відродження термопарних датчиків була поява комплексу доступних сучасних мікросхем, що спеціально пристосовані для вирішення проблеми “холодного” спаю, посилення слабкого температурного сигналу та наступної його обробки.

Принцип дії термоелектричного перетворювача (термопари) заснований на використанні термоелектричного ефекту, сутність якого полягає у виникненні термо-е.р.с. e_{θ} у ланцюзі, який складається з двох різнорідних провідників або напівпровідників, які називають термоелектродами, якщо температури θ_1 та θ_2 відповідних частин перетворювача різні (рис.3.1).

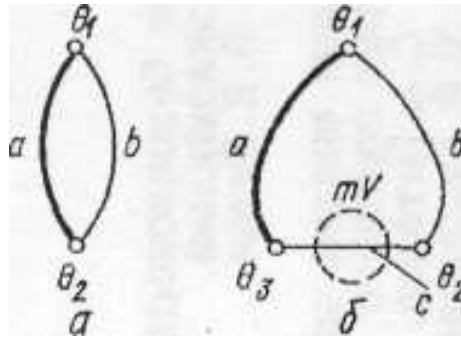


Рис.3.1. Найпростіші термоелектричні ланцюги

Виникнення термо-е.р.с. пояснюється сумарною дією двох термоелектричних ефектів: явища Томсона та явища Зеебека. Явище Томсона полягає у встановленні на кінцях однорідного провідника, що має температурний градієнт, деякої різниці потенціалів, внаслідок того, що електрони дифундують від гарячого кінця провідника до холодного. Е.р.с., що виникає, називається термо-е.р.с. Томсона та визначається виразом

$$e_{\theta} = \int_{\theta_1}^{\theta_2} \sigma d\theta \quad , \quad (3.12)$$

де σ – коефіцієнт Томсона для даного провідника.

Якщо скласти ланцюг з двох різних однорідних провідників a та b , то сумарна термо-е.р.с. Томсона дорівнює різниці термо-е.р.с. Томсона для кожного провідника та визначається виразом

$$e_{\theta ab} = \int_{\theta_1}^{\theta_2} (\sigma_a - \sigma_b) d\theta \quad , \quad (3.13)$$

σ_a, σ_b – коефіцієнти Томсона для провідника a та b відповідно.

Сутність явища Зеебека полягає в наступному. При з'єднанні двох різнорідних провідників у точці їхнього контакту виникає контактна різниця

потенціалів, що зумовлена різною концентрацією носіїв заряду. Зеебек встановив, що у замкнутому ланцюзі двох різnorodних провідників, спаї яких знаходяться при різних температурах, електрорушійна сила $E_{ab}(\theta_1)$, яка виникає при переході від провідника a до провідника b у точці з температурою θ_1 , та електрорушійна сила $E_{ba}(\theta_2)$, що виникає при переході від провідника b до провідника a , мають протилежні знаки та не дорівнюють одна одній.

Сумарна термо-е.р.с., що виникає у ланцюзі, який містить два різних провідника a та b , є сумою контактних е.р.с. та е.р.с. Томсона :

$$e_{ab}(\theta_1, \theta_2) = E_{ab}(\theta_1) + E_{ab}(\theta_2) + \int_{\theta_1}^{\theta_2} (\sigma_a - \sigma_b) d\theta \quad (3.14)$$

Ця сумарна термо-е.р.с. для даної пари провідників залежить тільки від значень температур θ_1 , θ_2 та може бути представленою різницею відповідних функцій:

$$e_{ab}(\theta_1, \theta_2) = e_{ab}(\theta_1) - e_{ab}(\theta_2) \quad (3.15)$$

При малій різниці температур спаїв можна припустити, що термо-е.р.с., що розвивається термопарою, пропорційна різниці температур спаїв:

$$e_{ab}(\theta_1, \theta_2) = \kappa(\theta_1 - \theta_2), \quad (3.16)$$

де κ – коефіцієнт пропорційності, різний для різних пар матеріалів термоелектродів.

Якщо один спай помістити у середовище з постійною температурою, наприклад, θ_2 , то термо-е.р.с., що виникає, в загальному випадку є нелінійною функцією температури θ_1 :

$$e_{ab}(\theta_1, \theta_2) = e_1(\theta_1) \quad (3.17)$$

Спай термопар, який поміщується у досліджуване середовище, має назву робочого, або гарячого, а кінці, температура яких підтримується звичайно постійною, - вільними або холодними.

Оскільки у ланцюг термопар підключається вимірювальний прилад, то у точці з'єднання створюються інші спаї, тому ланцюг термопар у простішому випадку слід розглядати як ланцюг, що містить три провідника a , b та c (рис.3.1, б). Сумарна термо-е.р.с. такого ланцюга

$$e = e_{ab}(\theta_1) + e_{bc}(\theta_2) + e_{ca}(\theta_3) \quad (3.18)$$

Оскільки згідно із закономірністю Вольта $e_{ca}(\theta) = -e_{ab}(\theta) - e_{bc}(\theta)$, то формулу (3.18) можна записати у вигляді:

$$e = e_{ab}(\theta_1) + e_{bc}(\theta_2) - e_{ab}(\theta_3) - e_{bc}(\theta_3) \quad (3.19)$$

Враховуючи, що:

$$\begin{aligned} e_{ab}(\theta_1) - e_{ab}(\theta_3) &= e_{ab}(\theta_1, \theta_3); \\ e_{bc}(\theta_2) - e_{bc}(\theta_3) &= e_{bc}(\theta_2, \theta_3), \end{aligned}$$

отримуємо

$$e = e_{ab}(\theta_1, \theta_3) + e_{bc}(\theta_2, \theta_3) \quad (3.20)$$

З цього виразу витікає, що якщо температури θ_2 та θ_3 на границях третього провідника не дорівнюють одна одній, то термо-е.р.с. термопар ab спотворюється е.р.с. $e_{bc}(\theta_2, \theta_3)$ паразитної термопар bc . Якщо ж на границях третього провідника температури рівні, то спотворення термо-е.р.с. основної термопар не спостерігається.

Вираз $e_{ca}(\theta) = e_{cb}(\theta) - e_{ab}(\theta)$ дозволяє визначити термо-е.р.с. будь-якої термопар при відомих термо-е.р.с. інших термопар, утворених кожним з

термоелектродів з базовим. Для порівняння термоелектричних характеристик матеріалів створена єдина платинова нормаль, по відношенню до якої визначаються термо-е.р.с. інших матеріалів. У довідковій літературі наводяться значення, що розвиваються найбільш поширеними термоелектродними матеріалами у парі з платиною при температурі робочого спаю $\theta_1 = 100^\circ\text{C}$ та температурі вільних кінців $\theta_0 = 0^\circ\text{C}$ (табл. 3.1).

Таблиця 3.1. Термо-е.р.с. деяких матеріалів у парі з платиною

Матеріал	Термо-е.р.с., мВ	Матеріал	Термо-е.р.с., мВ
Кремній	+44,8	Ртуть	0,00
Хромель	+2,4	Паладій	- 0,57
Ніхром	+2,2	Цинк	- 0,75
Залізо	+1,8	Нікель	- 1,2 ...- 1,9
Вольфрам	+0,8	Алюмель	- 1,7
Мідь	+0,76	Константан	- 3,4
Золото	+0,75	Копель	- 4,5
Платинородій (10% родію)	+0,64	Вісмут	- 5,2...- 7,7
Графіт	+0,32	Молібденіт	- 69...- 104

Наведені у таблиці 3.1 дані дозволяють визначити термо-е.р.с. термоелектричного перетворювача (складеного з будь-якої пари термоелектродів) як алгебраїчну різницю значень термо-е.р.с., що розвиваються відповідними термоелектродними матеріалами у парі з платиною. Оскільки залежність термо-е.р.с. від температури в широкому діапазоні температур як правило є нелінійною, то дані таблиці не можна розповсюджувати на більш високі температури. Слід також мати на увазі, що термо-е.р.с., які розвиваються термоелектродами, у значній мірі залежать від найменших домішок, механічної та термічної обробки (гартування, відпалу).

Існування великої кількості різноманітних конструкцій термоелектричних сенсорів пояснюється тією обставиною, що їхня розробка велася у різний час

багатьма підприємствами для різних галузей промисловості. У нинішній час створені та впроваджуються уніфіковані типи конструкцій сенсорів температури, які відрізняються універсальністю та технологічністю.

Перевагами термопарних датчиків, що зумовили їхнє використання у різних галузях техніки, є:

- 1) простота технології виготовлення та відтворюваність властивостей;
- 2) відмінне сполучення із сучасними засобами електроніки (мікросхемами посилення та обробки сигналів);
- 3) невисока собівартість;
- 4) лінійність характеристик у діапазоні суттєвих для медицини температур.

3.3. Терморезистивні датчики

Принцип дії терморезистивних сенсорів заснований на властивості провідників або напівпровідників змінювати свій електричний опір при зміні температури. Чутливість таких сенсорів в значній мірі визначається величиною температурного коефіцієнту опору (ТКО). Датчики температури повинні мати лінійну залежність опору від температури, мати певну швидкодію, стабільність параметрів у часі.

Для терморезистивних сенсорів використовують резистивні матеріали, які мають високу стабільність ТКО, високу відтворюваність електричного опору для даної температури, значний питомий електричний опір та високий ТКО, стабільність фізичних та хімічних властивостей при нагріванні, інертність до впливу досліджуваного середовища. Так, наприклад, терморезистори можуть бути виготовлені з суміші полікристалічних оксидів металів (MnO, CoO, NiO, CuO) у вигляді стрижнів, трубок, шайб, намистинок та тонких пластинок з мікромініатюрними розмірами від 1 – 10 мкм до 1 – 2 см.

З провідникових матеріалів широке розповсюдження отримала платина. Цей метал навіть при високих температурах в окислювальному середовищі не змінює своїх фізичні та хімічні властивості. Температурний коефіцієнт опору в діапазоні 0...100°C дорівнює приблизно $1/273 \text{ град}^{-1}$, питомий опір при 20°C дорівнює 0,105 Ом мм²/м, діапазон перетворюваних температур складає – 260...+1300°C [5].

Температурна залежність опору платини в діапазоні 0...650°C описується рівнянням Календара

$$R_{\theta} = R_0(1 + A\theta + B\theta^2), \quad (3.21)$$

де R_{θ} , R_0 – опори перетворювача при θ та 0°C; А та В – постійні коефіцієнти (для платинового дроту $A=3,9702 \times 10^{-3} \text{ 1/K}$, $B=-5,8893 \times 10^{-7} \text{ 1/K}^2$)

В інтервалі температур 0...-200°C залежність опору платини від температури має вигляд

$$R_{\theta} = R_0[1 + A\theta + B\theta^2 + C(\theta - 100)^3], \quad (3.22)$$

де $C=-4,356 \times 10^{-12} \text{ 1/K}^3$ – сталий коефіцієнт.

Залежності (3.21) та (3.22) є достатньо точною апроксимацією функції перетворення платинових сенсорів температури в широкому інтервалі.

Мідь, завдяки своїй низькій вартості та досить високій стійкості до корозії широко використовується у перетворювачах температури в діапазоні – 50...+180°C. Температурний коефіцієнт опору міді $\alpha_{\theta} = 1/234,7 \text{ 1/K}$, залежність електричного опору від температури – лінійна:

$$R_{\theta} = R_0(1 + \alpha_{\theta}\theta) \quad (3.23)$$

Окрім платини та міді для чутливих елементів сенсорів температури застосовують нікель, вольфрам та інші чисті метали (табл. 3.2).

Таблиця 3.2. Деякі фізичні властивості матеріалів терморезистивних перетворювачів при 20°С

Матеріал	ТКО, 10 ⁻³ 1/К	Питомий опір Ом·мм ² /м	Температура плавлення, °С	Термо-е.р.с. у парі з міддю, мкВ/°С
Платина	3,91	0,105	1773	7,5
Мідь	4,28	0,017	1083	0
Нікель	6,3...6,6	0,068	1455	22,5
Вольфрам	4,82	0,055	3410	0,5
Молибден	4,57	0,052	2630	
Рений	3,11	0,211	3170	
Родій	4,57	0,047	1960	
Графіт	0,02	46,0	3870	
Платинородій (20% родію)	1,21	0,160	1900	

Нікель має складну залежність опору від температури та невисоку її відтворюваність. У діапазоні температур -50...+180°С температурна залежність опору нікеля наступна:

$$R_{\theta} = R_0(1 + A\theta + B\theta^2 + C\theta^3) \quad , \quad (3.24)$$

де $A = 0,00547 \text{ 1/К}$, $B = 0,639 \times 10^{-5} \text{ 1/К}^2$, $C = 0,69 \times 10^{-8} \text{ 1/К}^3$ – постійні коефіцієнти.

Напівпровідникові терморезистори відрізняються від металевих великими значеннями ТКО, отож, меншими габаритами та інерційністю. Температурна залежність таких термоперетворювачів досить добре описується формулою

$$R_{\theta} = A e^{\frac{B}{\theta}} \quad , \quad (3.25)$$

де A, B - постійні коефіцієнти.

Існує багато різновидів напівпровідникових терморезисторів, які відрізняються конструктивними та технологічними параметрами. Це стрижньові напівпровідникові терморезистори, покриті емаллю (ММТ-1, КМТ-1), герметизовані металевою капсулою (ММТ-4, КМТ-4), краплевидні герметизовані склом (СТЛ-19, СТЗ-19) та інші. Номінальні значення опорів терморезисторів мають допуск звичайно $\pm 20\%$.

У загальному випадку коефіцієнт B не є сталою величиною. Однак залежність опору від температури напівпровідникових терморезисторів у робочому діапазоні перетворювань може бути достатньо точно апроксимована двома функціями та визначатися для низьких температур одним значенням B , а для високих – іншим.

Вадами напівпровідникових терморезисторів, що істотно знижують їхні експлуатаційні якості, є нелінійність залежності опору від температури, значний розкид як номінальних значень опорів різних зразків, так і їхніх ТКО.

Один з різновидів конструкцій терморезистивного датчика наведено на рис.3.2.

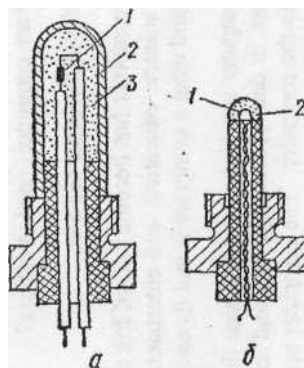


Рис. 3.2. Напівпровідникові терморезистивні перетворювачі температури

У такій конструкції терморезистор 1 поміщується у захисний корпус 2, який заповнюється спеціальною засипкою 3 (рис.2.2,а), або кріпиться до основи термоперетворювача за допомогою склоприпою 2 (рис.2.2,б). Відмінною особливістю напівпровідникових термоперетворювачів є малі габарити, мала

інерційність, але вони поступаються провідниковим терморезисторам за точністю.

Терморезистивний датчик характеризується високою чутливістю і тому його вимірювальна схема проста і надійна, але із-за невисокої стабільності сенсора та вимірювальної схеми у часі перед кожним вимірюванням необхідна калібровка прибору. На чутливість вимірювання температури впливає також площа торкання датчика з поверхнею, на якій вимірюється температура. Цей недолік зменшено у датчику, конструкція якого має майданчик, який фіксує положення сенсора на поверхні, так що площа торкання з поверхнею завжди одна і та ж.

3.4. Основи безконтактної термометрії

Усі тіла, температура яких вища за абсолютний нуль, випромінюють радіохвилі суцільного спектру частот (теплове радіовипромінювання). Інтенсивність теплового випромінювання пропорційна температурі тіла. Теплове випромінювання є потоком електромагнітних хвиль, що випромінюються тілом за рахунок його теплової енергії та повністю або частково поглинаються іншими тілами. Повна кількість теплової енергії, яка випромінюється абсолютно чорним тілом за одиницю часу одиницею поверхні, що має температуру θ , визначається за законом Стефана-Больцмана

$$E_0 = C_0 \left(\frac{\theta}{100} \right)^4, \quad (3.26)$$

де C_0 – коефіцієнт променевого випромінювання абсолютно чорного тіла.

Температурне випромінювання реальних тіл може значно відрізнитися від випромінювання абсолютно чорного тіла, тому їхній коефіцієнт променевого випромінювання C розраховується з обчисленням відносної випромінювальної здатності або ступеню чорноти тіла як $C = \epsilon C_0$. Коефіцієнт ϵ є фізичною сталою

випромінювача та у більшості випадків визначається експериментально, оскільки на його величину впливає стан поверхні. Значення ε для різних тіл знаходяться у межах від нуля до одиниці та наводяться у довідковій літературі.

Здатність тіла поглинати випромінювання характеризується його коефіцієнтом поглинання A , який чисельно дорівнює відношенню потоків випромінювання, що було поглинуте тілом, та падаючого випромінювання.

Нехтуючи поглинанням енергії у проміжному середовищі, результуючий потік променевої енергії q_{12} між двома тілами, які мають температури θ_1 та θ_2 та створюють замкнуту систему, може бути визначений як

$$q_{12} = C_0 \varepsilon_{np} \left[\frac{\varepsilon_1 \left(\frac{\theta_1}{100} \right)^4}{A_1} - \frac{\varepsilon_2 \left(\frac{\theta_2}{100} \right)^4}{A_2} \right] S_{12}, \quad (3.27)$$

де $\varepsilon_1, \varepsilon_2, A_1, A_2$ – коефіцієнти чорноти та поглинання відповідних поверхонь двох тіл; $S_{12} = \varphi_{12} S_1 = \varphi_{21} S_2$ – взаємна поверхня випромінювання тіл (тут $\varphi_{12}, \varphi_{21}$ – коефіцієнти опроміненості, або умовні коефіцієнти, які представляють собою відношення променивих потоків q_1 та q_2 , що випускаються тілами, до результуючого потоку q_{12}); S_1, S_2 – поверхні відповідних тіл;

$\varepsilon_{np} = \frac{1}{\left[1 + \varphi_{12} \left(\frac{1}{A_1} - 1 \right) + \varphi_{21} \left(\frac{1}{A_2} - 1 \right) \right]}$ – приведений коефіцієнт чорноти системи двох тіл.

Так, для двох паралельних площин, розміри яких значно більші, ніж відстань між ними, $\varphi_{12} = \varphi_{21} = 1$, $S_{12} = S_1 = S_2$, а для двох тіл, перше з яких не має угнутостей та охоплюється іншим, $\varphi_{12} = 1$, $\varphi_{21} = \frac{S_1}{S_2}$, $S_{21} = S_1$.

Незручність використання ступеневих залежностей теплових потоків від температури призвело до їхньої лінеаризації шляхом введення так званого коефіцієнту теплообміну випромінюванням $\alpha_{\text{п}}$ та за аналогією із законами Фур'є та Ньютона тепловий потік випромінювання системи двох тіл

$$q_n = \alpha_n S_{12}(\theta_1 - \theta_2) = \gamma_n \Delta\theta, \quad (3.28)$$

де $\alpha_n = C_0 \frac{\varepsilon_{np}}{\theta_1 - \theta_2} \left[\frac{\varepsilon_1}{A_1} \left(\frac{\theta_1}{100} \right)^4 - \frac{\varepsilon_2}{A_2} \left(\frac{\theta_2}{100} \right)^4 \right]$ - коефіцієнт теплообміну

випромінюванням; γ_n - теплопровідність випромінюванням.

Отже, рівняння теплового балансу сенсора, який поміщено в досліджуване середовище (рис.3.3), може бути записане у вигляді

$$q_3 = q_{m.n.} + q_{m.c} + q_k + q_n \quad (3.29)$$

$$\text{або } q_3 = \gamma_{m.n.}(\theta_n - \theta_0) + \gamma_{m.c}(\theta_n - \theta_c) + \gamma_k(\theta_n - \theta_c) + \gamma_n(\theta_n - \theta_{cm}), \quad (3.30)$$

де $q_{m.n.}$, $q_{m.c}$, $\gamma_{m.n.}$, $\gamma_{m.c}$ - теплові потоки та відповідні до них теплопровідності через сенсор та середовище; θ_n , θ_0 , θ_c , θ_{cm} - відповідно температури перетворювача, оточуючого середовища, досліджуваного середовища та стінок виміральної камери датчика.

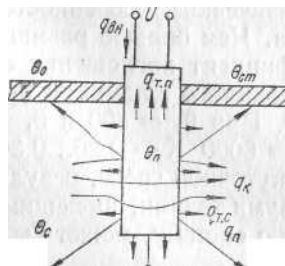


Рис.3.3. До рівняння теплового балансу.

З цього рівняння видно, що температура перетворювача залежить від температури досліджуваного та навколишнього середовища, коефіцієнта тепловіддачі, теплової провідності середовища, променевого теплообміну. Виділивши відповідну залежність, можна аналізувати процеси у теплових сенсорах, які використовуються не тільки для вимірювання температури, але і швидкості руху середовища, концентрації речовини та т.п.

У процесі роботи теплового сенсора в умовах зміни температури буде мати місце відповідна зміна його теплоємності:

$$Q_c = cm\theta_n \quad , \quad (3.31)$$

а тепловий потік зміни внутрішньої енергії

$$q_c = \frac{dQ_c}{dt} = cm \frac{d\theta_n}{dt} \quad , \quad (3.32)$$

де m, c – маса та теплоємність перетворювача.

Отже, з урахуванням теплового потоку зміни теплоємності рівняння теплового балансу прийме вигляд

$$q_3 = \gamma_{m,n}(\theta_n - \theta_0) + \gamma_{m,c}(\theta_n - \theta_c) + \gamma_{\kappa}(\theta_n - \theta_c) + \gamma_n(\theta_n - \theta_{cm}) + cm \frac{d\theta_n}{dt} \quad (3.33)$$

Особливості вимірювань теплового випромінювання полягають, наприклад, в основі медичної термографії – методі реєстрації природного випромінювання тіла людини в інфрачервоному, міліметровому та дециметровому діапазоні довжини хвиль.

4. Резистивні електричні перетворювачі

4.1. Резистори

Електричний опір є найбільш поширеним параметром вимірювальних ланцюгів різних перетворювачів. Електричний опір, або **резистор**, містить ізоляційний каркас, на який нанесено чутливий елемент у вигляді дроту або тонкого шару струмопровідного матеріалу, який має певний електричний опір. Діапазон номінальних значень опорів сучасних резисторів є вельми широким – від низькоомних (одиниці та долі Ома) до високоомних ($10^5 - 10^7$ Ом та більше). Погрішності у прецизійних резисторів доведені до тисячних часток відсотку, а у резисторів загального призначення можуть досягати декількох відсотків.

Основні характеристики резисторів.

Основними вважаються наступні характеристики резисторів:

- 1) Номінальний опір $R_{\text{ном}}$;
- 2) Допустима погрішність;
- 3) Допустима нестабільність у часі.

Ці характеристики регламентуються відповідними стандартами в залежності від типу резистора та від класу точності резистора.

Іншими важливими характеристиками резисторів, що визначають умови їхньої роботи, є наступні:

- 1) Номінальна потужність $P_{\text{ном}}$ або гранична робоча напруга U_{max} ;
- 2) Температурний коефіцієнт опору (ТКО);
- 3) Рівень власних шумів.

Номінальна потужність резистора – найбільша активна потужність, яку резистор може довгий час розсіювати за умовою, що його погрішність не

буде перевищувати значення, що регламентується класом точності резистора. Виходячи з номінальної потужності резистора та номінального опору встановлюється гранична робоча напруга:

$$U_{\max} = \sqrt{R_{\text{ном}} \times P_{\text{ном}}} \quad (4.1)$$

Температурна нестабільність, або температурний коефіцієнт опору (ТКО) характеризує відносну зміну опору, що викликана зміною температури на один градус.

Власні шуми резисторів складаються з **теплових та шумів струму**. Чинником **теплових шумів** є зміни об'ємної концентрації електронів в матеріалі, що проводить струм, що зумовлені тепловим рухом. Такі зміни носять характер флуктуацій. Теплові шуми притаманні усім видам резисторів. Напруга теплових шумів визначається за формулою Найквіста, про яку вже було згадано у попередньому розділі.

Шуми струму виникають тільки в недротових резисторах із зернистою структурою струмопровідного шару та виникають із-за нестабільності контактів між зернами, що проводять струм. Рівень шумів струму визначається відношенням діючого значення напруги шумів струму $U_{\text{ш}}$ до значення напруги U , що прикладена до резистора. Рівень шумів струму може досягати декількох мікрвольт на один вольт.

Нестабільність опору у часі резистора характеризується відносною зміною опору за великий проміжок часу (наприклад, за рік) та визначається властивостями матеріалу, що проводить струм, конструкцією резистора та його технологією виготовлення.

Опір резистора в загальному випадку не є чисто активним. Його можна представити у вигляді схеми, яка містить певні реактивності (індуктивність та ємність).

Резистори, що призначені для роботи не тільки у ланцюгах сталого, але і в ланцюгах змінного струму, мають зменшене значення залишкових реактивностей та носять назву **безреактивних**.

В залежності від вигляду матеріалу, що проводить струм, резистори можуть бути **дротовими** та **недротовими**.

Дротовий резистор має чутливий елемент у вигляді дроту, що намотаний на круглий або плоский каркас із ізоляційного матеріалу або металевий ізольований каркас. Резистори, що виготовлені з дротів діаметром більше, ніж 0,005 мм мають назву **дротових**. Якщо діаметр дроту є меншим, ніж 0,005 мм, то такі резистори мають назву **мікродротових**.

Матеріали дротових резисторів.

Основними параметрами, які характеризують властивості провідникових матеріалів, є:

- 1) Питомий електричний опір;
- 2) Температурний коефіцієнт питомого опору;
- 3) Термо-е.р.с. у парі з міддю;
- 4) Коефіцієнт лінійного розширення.

Питомий опір визначає розміри резистора. Для того, щоб розміри резистора були мінімальними, питомий опір матеріалу резистора має бути великим.

Температурний коефіцієнт питомого опору $T\alpha_p$ є характеристикою температурної нестабільності, отже, його значення має бути вельми малим, в ідеальному випадку має дорівнювати нулю.

Температурний коефіцієнт питомого опору $T\alpha_p$ матеріалу резистора слід відрізнити від **температурного коефіцієнту опору $T\alpha_0$** самого резистора, хоча ці дві величини завжди пов'язані між собою.

На значення $T\alpha_0$ резистора має сильний вплив **тензоефект**, тобто зміна опору чутливого елемента за рахунок механічної напруги, що викликана нагрівом при нерівних коефіцієнтах лінійного розширення чутливого елемента та каркасу. Механічна напруга, що виникає при цьому, може сильно відобразитися на нестабільності опору резистора у часі. Тому каркаси прецизійних резисторів виробляють звичайно з **алюмінієвих сплавів**, або

навіть **міді**, оскільки їхні температурні коефіцієнти розширення близьки до температурних коефіцієнтів розширення чутливих елементів.

Найбільш типовим та розповсюдженим матеріалом для виготовлення резисторів є **манганін** – сплав міді (приблизно 85%), марганцю (12 – 13%) та нікелю (приблизно 3 %). Питомий опір манганіну $\rho = 0,42 - 0,48 \text{ мкОм}\cdot\text{Ом}$, $\text{ТК}_\rho = (-3 - +4) 10^{-5} \text{ 1/К}$, термо- е.р.с. у парі з міддю $e_T = 1 - 2 \text{ мкВ/К}$. Манганін відрізняється високою стабільністю у часі, що досягають його спеціальною термообробкою – відпалом у вакуумі при температурі 550 – 600 °С з наступним повільним охолодженням. Для зняття механічної напруги, що виникає в матеріалі під час намотування резисторів, готові резистори підлягають **штучному старінню**, тобто циклічному нагріву до 120 - 130°С з наступним охолодженням до кімнатної температури. Річна нестабільність такого резистора може складати 0,001% та менше.

Іншим сплавом з високим питомим опором є **константан** (60% міді та 40% нікелю). Питомий опір константану дорівнює 0,48 – 0,52 мкОм*м, $\text{ТК}_\rho = (0,5 - 2,5)10^{-5} \text{ 1/К}$. Суттєвим недоліком константана є велика термо-е.р.с. в парі з міддю $e_T = 45 - 55 \text{ мкВ/К}$, що значно обмежує його застосування.

У нинішній час у всьому світі ведеться пошук нових сплавів з високим питомим опором та практично нульовим ТК_ρ . Винайдені сплави, що є перспективними у цьому відношенні : це мідь – марганець – германій та золото – хром.

Дротові резистори мають суттєву залишкову реактивність, для зменшення якої застосовують каркаси спеціальної конструкції. Діапазон номінальних значень опорів дровових резисторів лежить в межах від 0,001 Ом (без каркасна дротова петля) до 10^6 Ом. Більш високоомними є мікродротові резистори, виготовлені з манганіну.

Недротові резистори.

Чутливим елементом не дровових резисторів є тонкий шар матеріалу, що проводить струм, який нанесено на ізоляційний каркас.

З усього, що було викладено, можна зробити висновок, що резистори поділяються на дровові, частим випадком яких є мікродровові, та недротові. У свою чергу недротові резистори поділяються на вуглецеві, металізовані (металоплівкові та металооксидні), композиційні та печатні.

В композиційних резисторах провідним шаром є композиція матеріалів, що проводить та що не проводить струм.

Нестабільність у часі усіх видів недротових резисторів лежить у межах 1 – 5 % у рік (під нестабільністю у часі розуміють відносну зміну опору за тривалий проміжок часу, наприклад, за рік). Винятком є метало плівкові резистори, нестабільність яких не перевищує 0,05 – 0,1% за рік.

ТКО більшості не дровових резисторів дорівнює $(3 - 10)10^{-4}$ 1/К. Метало оксидні резистори мають на порядок менший ТКО.

Відмітною особливістю недротових резисторів є незначна залишкова реактивність, стала часу спеціальних конструкцій недротових резисторів може бути зведеною до $(0,2 - 2)10^{-10}$ с.

Печатні резистори виготовляють методом фотолітографії. Вихідним матеріалом таких резисторів є манганінова або ніхромова фольга, яка наклеєна на плоску ізоляційну підкладинку.

Номінальні значення опору прецизійних печатних резисторів лежать у межах $5 \cdot 10^{-3} - 5 \cdot 10^3$ Ом. Низькоомні печатні резистори виготовляють звичайно з манганіну, високоомні – з ніхрому.

4.2. Реостатні перетворювачі переміщень

Реостатними називають перетворювачі, виконані у вигляді реостату, рухливий елемент якого переміщується під дією вхідної перетворюваної величини. Вихідною величиною є електричний опір, пов'язаний з положенням рухливого елемента.

Реостатні перетворювачі поділяються на:

- дротові;
- недротові;
- фотоелектричні;
- рідинні;
- з провідникової кераміки.

Дротові реостатні перетворювачі можуть бути:

- з поступальним рухом рухливого елемента;
- з обертальним рухом рухливого елемента.

Переваги дротових реостатів:

- найвища точність;
- стабільність функції перетворення;
- низький рівень шумів;
- малий ТКО.

Недоліки дротових перетворювачів:

- низька роздільна здатність;
- невисокий опір (десятки кілоом)
- обмежена можливість застосування на змінному струмі.

Ці недоліки відсутні в не дротових реостатах, однак вони значно поступаються дротовим у точності.

Один з прикладів застосування реостатних перетворювачів – лінійний акселерометр.

Інерційна маса в лінійному акселерометрі безпосередньо пов'язана з рухливим елементом реостату та є чутливим елементом. При відсутності прискорення інерційна маса буде займати положення, при якому опір реостата дорівнюватиме нулю. Якщо досліджуваний об'єкт рухається зі сталим лінійним прискоренням (a), то на інерційну масу (m) діє сила:

$$F = - ma \quad (4.2)$$

Під дією цієї сили пружний елемент зазнає деформацію, в результаті чого в ньому виникає сила

$$F_{\text{упр}} = - Wx \quad (4.3),$$

де W – пружність пружного елемента, x – переміщення інерційної маси. За умовою рівноваги цих сил можна знайти переміщення :

$$x = ma/W \quad (4.4)$$

Величина та полярність вихідної напруги лінійного акселерометра визначатиметься величиною та напрямком прискорення досліджуваного об'єкта.

4.3. Резистивні перетворювачі струму та напруги

4.3.1. Додаткові опори

Додаткові опори служать для розширення меж вимірювань напруги магнітоелектричних, електромагнітних, електродинамічних вольтметрів. Додаткові опори є перетворювачами напруги в електричний струм. Рівняння перетворення додаткового опору може бути записане у вигляді:

$$I = U / (R_o + R_d) \quad (4.5),$$

де R_o – опір приладу, межі вимірювання якого розширюють; R_d – додатковий опір.

Додаткові опори виготовляють у вигляді дрових резисторів на круглих або плоских каркасах.

Резистори на круглих каркасах є більш компактними, але вони мають більшу залишкову індуктивність. Для того, щоб її зменшити, застосовують спеціальні види намотки.

Додаткові опори на плоских каркасах є більш громіздкими, але мають незначну залишкову індуктивність. Їх стала часу коливається в межах $(2 - 5) \cdot 10^{-9}$ с.

Додаткові опори можуть бути:

- одномежними та багатомежними;
- внутрішніми та зовнішніми; індивідуальними та взаємозамінними.

Згідно з ДСТУ зовнішні взаємозамінні додаткові опори мають класи точності від 0,01 до 1. Їх номінальний струм може дорівнювати 0,01; 0,02 – 7,5 мА.

Підчас розрахунку розмірів додаткових опорів слід пам'ятати, що найбільша температура їхнього перегріву не повинна перевищувати відповідно 60 °С для обмоток з дроту в шовковій ізоляції та бавовняній ізоляції, 65 °С для обмоток з дроту в емалевій ізоляції та 75 °С для обмоток з дроту в вініфлексовій ізоляції.

Для забезпечення мінімальних температурних погрішностей для додаткових опорів найвищого класу точності розрахунок їх розмірів проводять, виходячи з допустимої температури перегріву 25 °С – 35 °С.

Позначимо $\Delta\theta$ температуру перегріву додаткового опору, а P – потужність, що в ньому виділяється. Нехай вона задана. $\Delta\theta$ визначається поверхнею охолодження. Розрахунок додаткових опорів тому починають з визначення необхідної поверхні охолодження. Між $\Delta\theta$ та P існує прямопропорційна залежність:

$$\Delta\theta = k_d P / S_{\text{охл}} = k_d P_{\text{уд}} \quad (4.6)$$

$P_{\text{уд}}$ та k_d не залежать від конструктивних особливостей додаткових опорів. Відмітимо, що:

1) Для одиничної котушки та одиничної пластини:

$$P_{\text{уд}} = 80 - 90 \text{ мВт/см}^2; k_d = 0,65 - 0,70 \text{ град*см}^2/\text{мВт}$$

2) Для декількох пластин, розташованих вертикально:

$$P_{\text{уд}} = 65 - 75 \text{ мВт/см}^2; k_d = 0,8 - 0,9 \text{ град*см}^2/\text{мВт}$$

3) Для декількох пластин, розташованих горизонтально:

$$P_{\text{уд}} = 35 - 40 \text{ мВт/см}^2; k_d = 1,5 \text{ град*см}^2/\text{мВт}.$$

Тут $P_{\text{уд}}$ та k_d визначені експериментально. Отже, при заданих значеннях опору R_d та номінального струму $I_{\text{ном}}$ можливо визначити потужність, що розсіюється:

$$P = I_{\text{ном}}^2 R_d \quad (4.7)$$

та потрібну поверхню охолодження:

$$S_{\text{охл}} = P/P_{\text{уд}} \quad (4.8)$$

На рис. 4.1 схематично представлений перетин резистора на круглому каркасі. Поверхнею охолодження резисторів на круглих каркасах слід вва-

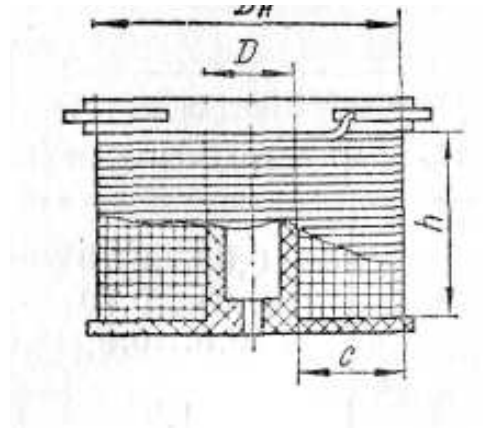


Рис. 4.1. Схема перетину резистора на круглому каркасі

жати лише зовнішню поверхню, що заповнена дротом:

$$S_{\text{охл}} = \pi D_n h \quad (4.9)$$

Ізоляційний каркас практично не відводить тепло.

Поверхня охолодження плоского добав очного опору, у тому числі з намоткою у декілька шарів, визначається як:

$$S_{\text{охл}} = 2al \quad (4.10),$$

де a – ширина пластини, l – довжина пластини.

Перегрів додаткового опору, який містить декілька пластин, залежить від їхнього розташування. При вертикальному розташуванні пластин та кращій циркуляції повітря перегрів є меншим, ніж при горизонтальному розташуванні. При вертикальному розташуванні:

$$S_{\text{охл}} = 2aln \quad (4.11),$$

де n - кількість пластин.

При горизонтальному розташуванні:

$$S_{\text{охл}} = 2al + 2(n-1)lh \quad (4.12),$$

де h – відстань між пластинами.

Визначивши поверхню охолодження, визначають розміри котушок та пластин, а також їх кількість. Значення $R_{\text{уд}}$ та $k_{\text{д}}$ є приблизними тому отримані за допомогою такого розрахунку розміри котушок та пластин будуть приблизними та потребують експериментального уточнення.

Якщо відомий опір однієї котушки або пластини та їхні геометричні розміри, можна розрахувати діаметр дроту та кількість витків. Слід відмітити, що кількість витків залежить від діаметру дроту з ізоляцією, а також від щільності намотки.

4.3.2. Шунти

Шунт – це резистор, який має чотири затиски та який призначено для розширення меж вимірювання за струмом магнітоелектричних приладів. На рис. 4.2 представлено схематичне зображення шунта.

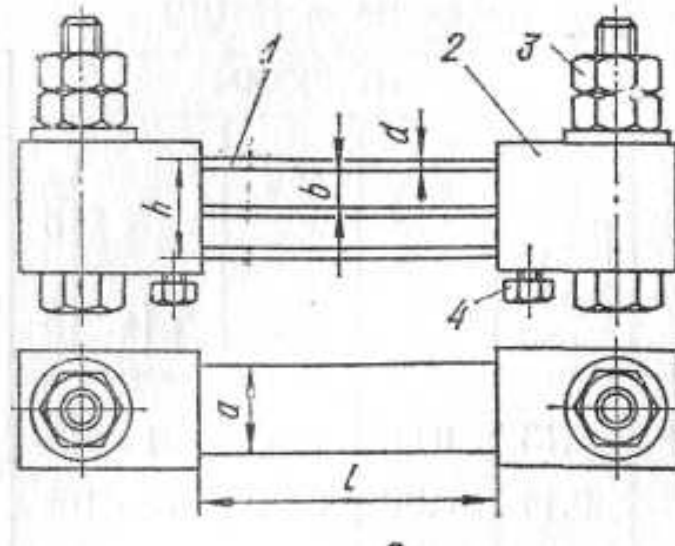


Рис. 4.2. Схематичне зображення шунта:

1 – токові затиски; 2 – потенційні затиски; 3 – масивні наконечники з латуні або міді; 4 – пластины або стрижні.

Шунти можуть бути:

- внутрішніми або зовнішніми;
- індивідуальними або взаємозамінними.

Взаємозамінні шунти згідно з ДСТУ виготовляють на номінальну напругу 60 мВ або 75 мВ та вони можуть мати клас точності від 0,02 до 0,5. Номінальний струм шунтів може бути від часток ампера до 10 000 А.

Номінальний опір шунта в Омах:

$$R_{\text{ш}} = 10^{-3} U_{\text{ном}} / (I_{\text{ном}} - I_{\text{п.ном}}) \quad (4.13),$$

де $U_{\text{ном}}$ – номінальна напруга (в мВ); $I_{\text{ном}}$ – номінальний струм шунта (в А); $I_{\text{п.ном}}$ – та приладу, межі вимірювань якого розширюють (в А).

Зовнішні калібровані шунти виготовляють звичайно з пластинчатого або стрижньового манганіну. Внутрішні, а також зовнішні калібровані шунти на малий номінальний струм можуть бути виготовлені із стрічкового манганіну або з манганінового дроту.

Розрахунок конструктивних параметрів шунта, саме так, як і додаткових опорів, проводиться виходячи з допустимого його перегріву за нормальних умов роботи, який визначається питомою потужністю, тобто відношенням потужності, що розсіюється у шунті, до поверхні охолодження.

Одно пластинчаті шунти розраховані на струм до 100 А. Для них під поверхнею охолодження розуміють поверхню самої пластини, для багато пластинчатих – поверхню, що огинає усі пластини.

Згідно з ДСТУ, перегрів будь-якої частини шунта не повинен перевищувати 80 °С. Формула (4.6) залишається вірною і для шунтів.

1) Для однопластинчатого шунта з тонкими наконечниками:

$$P_{\text{уд}} = 145 - 160 \text{ мВт/см}^2; k_{\text{ш}} = 0,50 - 0,55 \text{ град*см}^2/\text{мВт};$$

2) Для однопластинчатого шунта з масивними наконечниками:

$$P_{\text{уд}} = 200 - 260 \text{ мВт/см}^2; k_{\text{ш}} = 0,30 - 0,40 \text{ град*см}^2/\text{мВт};$$

3) Для багатопластинчатого шунта:

$$P_{\text{уд}} = 260 - 400 \text{ мВт/см}^2; k_{\text{ш}} = 0,20 - 0,30 \text{ град*см}^2/\text{мВт}.$$

Значення $k_{\text{ш}}$ залежить від конструкції шунта, розмірів наконечників, способу розміщення пластин. При горизонтальному розміщенні пластин

температура перегріву буде більшою, ніж при вертикальному. Звичайно розрахунок ведуть для найбільш несприятливого випадку, тобто випадку горизонтального розміщення пластин.

При заданих $I_{\text{ном}}$ та $U_{\text{ном}}$ визначають опір шунта $R_{\text{ш}}$, потужність, що розсіюється при номінальному струмі $P = I^2 R_{\text{ш}}$ та поверхню охолодження, що потребується $S = P/P_{\text{уд}}$.

Вихідними рівняннями для визначення основних розмірів пластин приймають рівняння

$$R_{\text{ш}} = \rho l 10^{-3} / (a d n) \quad (4.14)$$

$$S = 2 (al + ha + lh) \quad (4.15),$$

де l – довжина пластини; a – ширина; d – товщина, n – кількість пластин, h – висота шунта. Товщину d пластини звичайно задають, а відстань між ними приймають рівною $(8 - 15)d$. Площу поперечного перетину пластини розраховують, виходячи з допустимої щільності струму. Визначивши з (4.14) відношення l/a , та підставивши його в (4.15), знайдемо вираз для ширини пластинки, тим самим, і для її довжини. Якщо отримані розміри a та l шунта будуть конструктивно незадовільними, тоді розрахунок повторюють для інших значень b і d . Для зменшення довжини шунтів іноді пластини роблять гофрованими.

4.3.3. Дільники напруги

Схема найпростішого однограничного резистивного дільника напруги наведена на рис. 4.3.

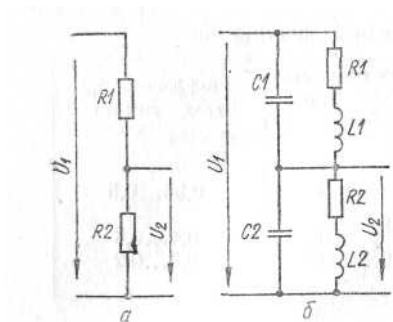


Рис. 4.3. Еквівалентні схеми однограничного резистивного дільника напруги на сталому (а) та на змінному (б) струмі.

Коефіцієнт перетворення такого дільника за умови, що він навантажений на безкінечно великий опір:

$$K_{\pi} = R_2 / (R_1 + R_2) \quad (4.16)$$

На практиці користуються поняттям коефіцієнта ділення, що є величиною, зворотною до коефіцієнта перетворення:

$$K_{\text{д}} = 1/K_{\pi} = (R_1 + R_2) / R_2 \quad (4.17)$$

Якщо вираз (4.17) про диференціювати за формулою для відносної погрішності коефіцієнта ділення, тобто:

$$\delta K_d = \Delta K_d / K_d \quad (4.18),$$

ми отримаємо вираз:

$$\delta K_d = [R_1 / (R_1 + R_2)] (\delta R_1 - \delta R_2) \quad (4.19)$$

Підставивши у цей вираз формулу (4.16), отримаємо:

$$\delta K_d = (1 - K_p) (\delta R_1 - \delta R_2) \quad (4.20)$$

З цього виразу слідує дуже важлива властивість дільників: **Погрішність коефіцієнта ділення визначається не відхиленнями опорів R_1 і R_2 від номінальних значень, а лише нерівністю їх відносних змін.**

Отже, нестабільність у часі опорів, їх зміни, що викликані змінами температури та іншими факторами, не впливають на погрішність коефіцієнта ділення, якщо відносні значення цих змін однакові. При $\delta R_1 = \delta R_2$ погрішність коефіцієнта ділення дорівнюватиме нулю.

У випадку, коли ТКО окремих резисторів є різними, або резистори знаходяться у неоднакових температурних умовах, можуть виникати значні температурні погрішності дільників напруги (коефіцієнта ділення). З метою зменшення погрішностей необхідно підбирати резистори з однаковими ТКО та забезпечувати такі умови, при яких температури обох резисторів були б однаковими. Найкращим чином ці умови виконуються в печатних резистивних дільниках, погрішність яких може бути зведеною до 0,0005%.

5. Тензорезистивні сенсори

В основі принципу роботи тензорезисторів полягає явище тензоефекту, або тензорезистивного ефекту. **Тензоефект** – це зміна електричного опору матеріалу, що проводить струм під впливом його механічної деформації. Основною характеристикою чутливості матеріалу до механічної деформації є **коефіцієнт відносної тензочутливості (k)**, що визначається як відношення відносної зміни опору до відносної зміни довжини провідника:

$$k = \varepsilon_R / \varepsilon_l = (\Delta R / R) / (\Delta l / l) \quad (5.1)$$

У свою чергу:

$$R = \rho l / S \quad (5.2),$$

де ρ – питомий опір провідника, l – його довжина, S – площа поперечного перетину провідника. Про диференціювавши цей вираз за всіма цими трьома величинами, а потім поділивши отриману формулу на (5.2), отримаємо:

$$\Delta R / R = \Delta \rho / \rho + \Delta l / l - \Delta S / S \quad (5.3)$$

Тобто, відносна зміна опору, що викликана деформацією провідника під дією рівномірної механічної напруги σ :

$$(1/R)(dR/d\sigma) = (1/l)(dl/d\sigma) - (1/S)(dS/d\sigma) + (1/\rho)(d\rho/d\sigma) \quad (5.4)$$

Підчас деформації твердих тіл зміна їх довжини пов'язана зі зміною об'єму. При цьому зміна об'єму в зоні пружних деформацій для кожного матеріалу є величиною сталою та характеризується коефіцієнтом Пуасона:

$$\mu = -\varepsilon_v/\varepsilon_1 = -(\Delta d/d)/(\Delta l/l) \quad (5.5),$$

де d – діаметр провідника круглого перетину або поперечний розмір провідника квадратного перетину. Тобто:

$$d^2 = S \quad (5.6)$$

Продиференціюємо цей вираз:

$$2d\Delta d = \Delta S$$

Поділивши обидві частини цього рівняння на вихідний вираз (5.6) та на двійку, отримаємо:

$$\Delta d/d = (1/2)(\Delta S/S) = -\mu (\Delta l/l) \quad (5.7)$$

Виходячи з визначення коефіцієнта відносної тензочутливості та з формули (5.2), а також враховуючи, що:

$$\Delta S/S = -2\mu\Delta l/l,$$

Отримаємо:

$$k = 1 + 2\mu + (\Delta\rho/\rho)/(\Delta l/l) \quad (5.8)$$

Для деяких металів питомий електричний опір практично не змінюється під впливом механічних деформацій, і коефіцієнт відносної тензочутливості може бути для них прийнятим $k = 1 + 2\mu$. Оскільки коефіцієнт Пуасона для металів лежить у межах $\mu = 0,24 - 0,4$, то значення коефіцієнта відносної тензочутливості часто вважають приблизно рівним $k = 1,48 - 1,8$.

В загальному випадку коефіцієнт тензочутливості провідника містить складову, яка визначається зміною його питомого електричного опору та може бути як додатною, так і від'ємною. Для металів $k = 0,5 - 4$. Механічна напруга σ у досліджуваній деталі пов'язана з модулем пружності E (модуль Юнга) цієї деталі співвідношенням:

$$\sigma = E (\Delta/l) \quad (5.9)$$

Отже, з (5.1) та (5.9) можна отримати:

$$\Delta R/R = k \sigma / E \quad (5.10)$$

Як матеріал досліджуваної деталі, так і матеріал дроту тензорезистора має підлягати механічній нарузі, що не перевищує межі пружних деформацій, у протилежному випадку в матеріалі відбудуться незворотні деформації. Тому допустиме значення механічної напруги не перевищує 20 – 30% межі пружності.

Оскільки значення відносної деформації Δ/l в межах пружних властивостей матеріалу не перевищує $2,5 \cdot 10^{-3}$, то при $k = 0,5 - 4$ відносна зміна опору $\Delta R/R = (1,25 - 10) \cdot 10^{-3}$, тобто не перевищує 1%. У зв'язку з цим опір тензорезистора повинен 1) мати високу стабільність у часі; 2) мати незначний ТКО.

Крім цього, до матеріалів тензорезисторів пред'являються наступні основні вимоги:

- можливо більше значення коефіцієнта тензочутливості;
- високий питомий електричний опір;
- температурний коефіцієнт лінійного розширення чутливого елемента перетворювача повинен бути рівним температурному коефіцієнту лінійного розширення матеріала досліджуваного об'єкту.

Коефіцієнт тензочутливості напівпровідникових тензорезисторів визначається в основному зміною питомого електричного опору:

$$m = (\Delta\rho/\rho)/\Delta l/l \quad (5.11)$$

Значення m напівпровідникових тензорезисторів, на відміну від провідникових, у значній мірі залежать від:

- 1) ступеню деформації;
- 2) температури;
- 3) питомого електричного опору;
- 4) типу провідності.

Коефіцієнт тензочутливості для напівпровідникових тензорезисторів дорівнює 150 – 200. При цьому в напівпровідниках n - типу коефіцієнт тензочутливості є від'ємним, а в напівпровідниках p - типу – додатнім.

Приведемо значення коефіцієнтів тензочутливості та модулів Юнга для основних провідникових та напівпровідникових тензорезистивних матеріалів.

- 1) Константан: $k = 1,9 - 2,1$; $E = 150$ ГПа.
- 2) Ніхром: $k = 2,1 - 2,3$; $E = 180$ ГПа;
- 3) Платинородій: $k = 5,1 - 5,5$; $E = 180$ ГПа;
- 4) Германій :
 - n – типу [111] : $m = -150$; $E = 155$ ГПа;
 - p – типу [111] : $m = +100$; $E = 155$ ГПа;

5) Кремній:

n – типу [100] : $m = -130$; $E = 130$ ГПа;

p – типу [111] : $m = +175$; $E = 190$ ГПа.

Для рідких тензорезистивних матеріалів (ртуть, електроліти), які практично не змінюють свого об'єму в процесі деформації, $k = 2$. Дійсно, при постійному об'ємі V опір R провідника з постійним поперечним перетином вздовж всієї довжини є пропорційним квадрату довжини:

$$R = \rho l/S = \rho l^2/V \quad (5.12)$$

При $V = \text{const}$ та $\rho = \text{const}$

$$\Delta R = (\rho/V) 2l\Delta l \quad (5.13)$$

Якщо останні дві формули підставити в формулу для коефіцієнта відносної тензочутливості (5.1), то ми отримаємо значення $k = 2$ для коефіцієнта тензочутливості рідких тензорезистивних матеріалів.

У практиці вимірювальних перетворювачів тензорезистивний ефект використовується у двох напрямках.

Перший напрямок – це зміна опору провідника або напівпровідника в результаті об'ємного стиснення. Вхідною величиною такого перетворювача є тиск оточуючого його газу або рідини. На цьому принципі розбудовуються перетворювачі високого та надвисокого тиску, які виготовляються у вигляді безкаркасної обмотки, намотаної звичайно з манганінової проволочки. Перетворювачами низького тиску є звичайно германієвий або кремнієвий тензорезистор.

Другий напрямок – це використання тензоефекту тензочутливого матеріалу, що розтягують або стискають. Перетворювачі цієї групи можуть

бути виконані у вигляді дротових, фольгових, плівкових тензорезисторів, що наклеюються, або вільних навісних тензорезисторів.

Одиночні тензорезистори, що наклеюються.

В якості матеріалів для виготовлення дротових тензорезисторів використовується, частіше за все, константан, ніхром, елінвар, платинородій. Однак найбільше розповсюдження у вітчизняній тензометрії отримали тензорезистори зі спеціальної константанового мікродроту діаметром 0,025 – 0,035 мм.

Розглянемо найбільш розповсюджені конструкції тензорезистивних перетворювачів, що наклеюються.

1. Конструкція перетворювача з **плоскою формою решітки** показана на рис. 5.1,а.

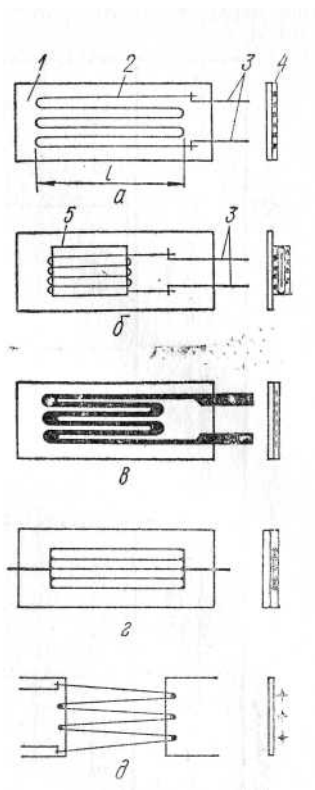


Рис. 5.1. Деякі різновиди тензоперетворювачів

На рис. 5.1, а: 1 – підкладинка з тонкого паперу або лакової плівки, на яку наклеєна плоска решітка 2 з тензочутливого дроту. До кінців дроту приєднані пайкою або зваркою виводи 3 з мідного дроту. Зверху перетворювач покритий шаром лаку. Такі тензоперетворювачі мають вимірвальну базу 1 (довжина, що зайнята дротом) звичайно 3 – 20 мм, а їх опір дорівнює 20 – 500 Ом.

2. Для отримання тензоперетворювачів з **малою базою** (1 – 3 мм) їх виконують **двохшаровими** та виготовляють шляхом намотки тензочутливого дроту 2 на трубчастий паперовий каркас 4, який після приклеювання розплющується та наклеюється на підкладинку 1 (рис. 5.1, б)

Погрішність дрових тензорезисторів може бути зведеною до 0,1 – 0,2 %.

3. **Фольгові** тензоперетворювачі – це наклеєна на підкладинку 1 тензочутлива решітка 2, що витравлено з фольги товщиною 0,01 – 0,02 мм.

Фольгові тензоперетворювачі мають певні переваги перед дровими. Зокрема, оскільки відношення поверхні тензочутливої доріжки до її поперечного перетину є великим, то покращується тепловіддача, що дозволяє значно збільшити щільність струму. Недоліком таких тензоперетворювачів є те, що вони мають порівняно низький електричний опір, що звичайно не перевищує 50 Ом (рис. 5.1, в).

4. **Плівкові** тензоперетворювачі виготовляють шляхом вакуумної возгонки тензочутливого матеріалу з наступною конденсацією його на підкладинку. Для виготовлення плівкових тензорезисторів застосовуються як металеві матеріали (наприклад, титаноалюмінієвий сплав), так і напівпровідникові матеріали (германій, кремній).

Підчас виготовлення як фольгових, так і плівкових тензоперетворювачів можна передбачити будь-який малюнок їх решітки, завдяки чому вони можуть бути застосовані для дослідження механічної напруги деталей найрізноманітнішої конфігурації.

5. **Тензоперетворювачі великої потужності** представлені на рис. 5.1, г. Їхні чутливі елементи виконують з великої кількості (до 30 або навіть до 50) паралельно поєднаних дротів. Такі перетворювачі мають звичайно велику базу (150 – 200 мм), у протилежному випадку вони мали б дуже малий опір.

6. **Вільні, або навісні** тензорезистивні перетворювачі (рис. 5.1, д) мають дротовий тензочутливий елемент 2, у вигляді струни або декількох струн, натягнутих між двома планками 1 та 3, відносно переміщення яких є вхідною величиною таких перетворювачів. Застосовуються вони звичайно в датчиках тиску. В цьому випадку одна планка є нерухомою, а інша переміщується під впливом перетворюваного тиску.

7. **Напівпровідникові монокристалічні** тензорезистори виготовляють звичайно з германію та кремнію, які мають кубічну кристалічну ґратку. У такій ґратці прийнято розрізнити 3 основні кристалографічні напрямки, що позначаються індексами Міллера. Це напрямки [100], [110], [111]. Чутливість напівпровідникового тензорезистора залежить від орієнтації його чутливого елементу (напівпровідникової нитки) відносно кристалографічних напрямків, тобто, в напівпровідниках, на відміну від провідників, спостерігається анізотропія тензоефекту.

Сучасна напівпровідникова тензометрія

Сучасна напівпровідникова тензометрія має три напрямки.

Перший напрямок пов'язаний з розвитком одиночних напівпровідникових тензорезисторів, що приклеюються. Одиночні напівпровідникові тензорезистори є функціональними аналогами провідникових. Вони можуть бути з підкладками та без підкладок. Широко розповсюджені тензорезистори без підклади нок типу Ю-8 та Ю-12 (рис.5.2).

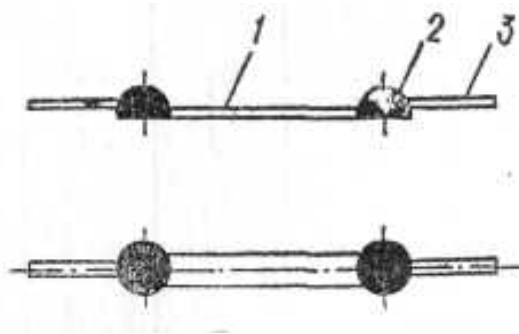


Рис. 5.2. Одиночний напівпровідниковий тензорезистор,
що приклеюється Ю-8

Вони оформлені у вигляді гантелеподібної пластини кремнію 1, яка вирізана у кристалографічному напрямку найбільшого тензорезистивного ефекту. На кінці пластини наносять контактний шар 2 та термокомпресією преднують виводи 3. Коефіцієнт тензочутливості таких елементів складає $k = 90 - 130$. База 1 дорівнює 5 – 7 мм. Номінальний електричний опір таких тензоперетворювачів лежить у межах 100 – 200 Ом.

Переваги таких тензоперетворювачів:

- висока чутливість;
- мініатюрність;
- - можливість отримання вихідного сигналу високого рівня.

Недоліки:

- складність монтажу;
- сильний вплив температури;
- пружня недосконалість;
- великий розкид метрологічних характеристик.

Ці резистори уступають по точності дровим резисторам. Їх погрішність лежить у межах 0,5 – 1%.

Другий напрямок передбачає створення інтегрального тензомодуля. В інтегральних тензомодулях пружній елемент виконується з монокристалічного напівпровідника, на якому шляхом дифузії або іонного легування формують інтегральну тензочутливу схему. В залежності від призначення тензомодулі виготовляють у вигляді стовбчиків, балок або мембран. Перетворювачі з інтегральними тензомодулями відрізняються більш високою точністю, чим одиночні напівпровідникові тензорезистори.

Третій напрямок – застосування напівпровідникових мостових тензорезистивних структур. Це – монолітно поєднані в схему одинарного моста напівпровідникові тензорезистори (рис. 5.3).

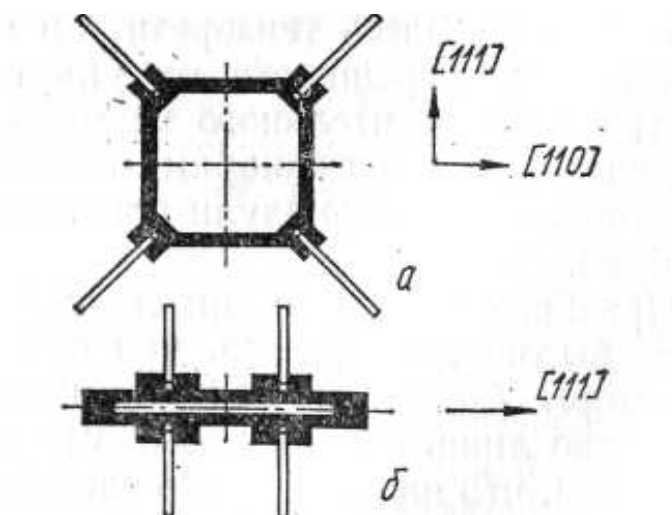


Рис. 5.3. Напівпровідникові тензорезистивні мостові структури:

а – датчик розтягування, стиснення та вигину;

б – мембранний датчик тиску

Датчики, виконані на онові мостових тензорезистивних структур, є більш точними у порівнянні з одиночними напівпровідниковими резисторами: їх погрішність – 0,1 – 0,2 %, а у порівнянні з тензомодулями вони є більш технологічними і універсальними.

Основні техніко-метрологічні характеристики тензорезисторів

До основних техніко-метрологічних характеристик тензорезисторів відносяться:

1. Тензочутливість.
2. Повзучість.
3. Механічний гістерезіс.
4. Температурна нестабільність.
5. Динамічні характеристики.

Тензочутливість визначається як тензорезистивними властивостями матеріалу чутливого елемента, так і конструкцією перетворювача, матеріалом основи, видом та умовами полімеризації клею та іншими факторами, Тензочутливість тензорезистора, як і саме тензорезистивного матеріалу, визначається коефіцієнтом відносної тензочутливості k .

Повзучість проявляється у вигляді зміни вихідного сигналу при заданому незмінному значенні деформації та визначається звичайно як

$$\delta_{\text{п}} = \Delta \varepsilon_1 / \varepsilon_1 \quad (5.14),$$

де ε_1 – приведена до входу зміна вихідного сигналу при заданій відносній деформації ε_1 . Причиною повзучості є пружня недосконалість основи та клею. У межах пружнього діапазону деформацій повзучість більшості тензорезисторів не перевищує 0,5 – 1 % за першу годину після приклеювання та відповідно 1 – 1,5 % за 6 годин.

Механічний гістерезіс, як і повзучість, зумовлений пружньою недосконалістю основи та клею та чисельно визначається як приведена до входу різниця значень вихідного опору для одного й того ж значення деформації за умови, що дане значення деформації досягається при плавному її збільшенні та плавному зменшенні. Для різних типів тензорезисторів механічний гістерезіс лежить в межах 0,5 – 5 %.

Температурна нестабільність, або вплив температури оточуючого середовища на основні параметри тензорезисторів, міститься, з одного боку, в зміні опору тензорезистора за рахунок його ТКО, а з іншого – в появі додаткової механічної напруги внаслідок різниці у температурних коефіцієнтах лінійного розширення досліджуваної деталі та матеріалу тензорезистора. Якщо β_d та β_n – температурні коефіцієнти лінійного розширення досліджуваної деталі та підкладинки тензорезистора, то відносна деформація тензорезистора, що зумовлена зміною температури оточуючого середовища на $\Delta\theta$:

$$\varepsilon_\theta = \Delta l_\theta / l = (\beta_d - \beta_n) \Delta\theta \quad (5.14),$$

а зміна його опору при цьому

$$\Delta R = k R \Delta l_\theta / l = k R (\beta_d - \beta_n) \Delta\theta \quad (5.15)$$

Оскільки зміна опору тензорезистора, зумовлена наявністю ТКО матеріалу чутливого елемента α_θ , дорівнює $\Delta R_\alpha = R \alpha_\theta$, то загальна зміна опору, що викликана зміною температури оточуючого середовища на $\Delta\theta$:

$$\Delta R_\theta = k R (\beta_d - \beta_n) \Delta\theta = R [\alpha_\theta + k (\beta_d - \beta_n)] \Delta\theta \quad (5.16)$$

Основною динамічною характеристикою тензорезисторів є їх **власна частота**, значення якої для тензорезисторів, що наклеюються, лежить в межах 100 – 300 кГц. Власна частота тензорезистора визначає граничну частоту досліджуваного процесу, при якому частотною недосконалістю можна знехтувати. Для дослідження змінних деформацій звичайно вибирають тензорезистивний перетворювач, власна частота якого хоча б у 5 – 10 разів перевищувала частоту деформацій.

Ще одним важливим параметром тензорезисторів є його *допустима потужність* P , яка може розсіюватися у тензорезисторі за умови, що його перегрів не перевищуватиме допустимого значення. Допустима потужність тензорезистора знаходиться у певній залежності від його геометричних розмірів, що може використовуватися як при визначенні P для відомих тензорезисторів, так і при визначенні геометричних розмірів перетворювачів, що проектуються, виходячи з заданої допустимої потужності або допустимого значення вимірюваного струму:

$$\Delta\theta = P R_T = P/(S_o\alpha_T) = P_{уд}/\alpha_T \quad (5.17),$$

де R_T – тепловий опір; S_o – площа поверхні тепловіддачі матеріалу тензорезистора; α_T – коефіцієнт тепловіддачі; $P_{уд} = P/S_o$ – питома тепла навантаження.

Відвід теплоти від тензорезистора до досліджуваної деталі крізь шар клею та підкладинку значно перевищує тепловіддачу в оточуюче повітря. Тому можна вважати, що практично уся теплота відводиться у досліджувану деталь, а а під площею S_o розуміють для плівкових та фольгових тензоперетворювачів поверхню тензорезистора, повернуту до досліджуваної деталі, а для дротових – половину циліндричної поверхні дроту чутливого елемента.

Питома потужність дротових, фольгових та напівпровідникових тензорезисторів, що використовуються у нинішній час незалежно від потужності, яка в них розсіюється та повної поверхні, що займає чутливий елемент, звичайно коливається в межах $P_{уд} = 26 - 28 \text{ кВт/м}^2$ (мВт/мм^2).

Допустиме значення вимірювального струму крізь тензорезистор може бути визначене зі співвідношення:

$$P = I^2 R = P_{уд} S_o \quad (5.18)$$

Для дротових тензорезисторів з базою 1 кількістю дротів у решітці чутливого елемента n та діаметром дроту d :

$$S_o = (\pi d/2) n l \quad (5.19)$$

$$R = (4 n l \rho) / (\pi d^2) \quad (5.20),$$

Звідки

$$I_{\text{доп}} = \sqrt{\frac{P y \delta S_o}{R}} = \sqrt{\frac{P y \delta \pi^2 d^3}{8 \rho}} \quad (5.21)$$

Перелік літератури:

1. Полищук Е.С. Измерительные преобразователи.- Киев: Высш. шк., 1981.- 296 с.
2. К. Бриндли. Измерительные преобразователи. Справочное пособие.- М.: Энергоатомиздат,1991.
3. Т.М. Алиев, А.А. Тер - Хачатуров. Измерительная техника.- М.: Высшая школа, 1991.
4. П.Хоровиц, У. Хилл. Искусство схемотехники, т.2.- М.: Мир, 1986.
5. В.Л. Костенко, Є.Я. Швець. Фізичні основи сенсорики. Запоріжжя, вид-во ЗДІА, 2002. – 157 с.